第37卷 第6期
2020年11月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

矿井水排放湖泊沿岸土壤氮素空间分布规律的研究
——以宁夏灵武园疙瘩湖为例

段文艳， 于小娟， 唐 明， 严 洁， 李 鑫， 张文瑞， 盛 敏
（西北农林科技大学林学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要：为探明湖泊滨岸对矿井水中氮素的截留与缓冲作用及其与滨岸土壤氮素空间分布间的关系，以宁夏灵武市羊场湾煤矿矿井水排放湖泊——园疙瘩湖为研究对象，测定了该湖水滨区域、近岸陆域和自然区域土壤中8种氮素的含量和土壤酶的活性，分析了水滨区域和近岸陆域与自然区域相比的土壤氮素变化系数及其随距矿井水排放口距离远近的变化规律。结果表明：园疙瘩湖滨岸土壤氮素空间分布存在异质性；相比较而言，水滨区域与周边自然区域的土壤氮素分布特征差异较大，而近岸陆域与周边自然区域的差异较小；相较于无机态氮，有机态氮的空间异质性更强；各有机氮形态中，颗粒物有机氮多被截留于离岸最近的水滨区域，而氨基酸氮和可溶性有机氮则需要更为宽阔的截留区域；水滨区域对颗粒物有机氮的截留效应随着距矿井水排放口距离的增加而降低；水滨区域和近岸陆域对氨基酸氮的截留效应在1400 m内逐渐降低，而在1400 m后趋于稳定；水滨区域和近岸陆域对可溶性有机氮的截留效应与其离矿井水排放口的距离无关，这可能是因为可溶性有机氮的易溶解特性使其随水体的迁移性较强，滨岸带土壤虽在吸附和缓存可溶性有机氮中发挥了一定的作用，但其较强的迁移性致其在滨岸带土壤中的分布较为均一；滨岸土壤氮素的空间异质性与土壤酶活性无关。综上可知，湖泊滨岸土壤对矿井水中有机态氮具有截留作用，且该截留作用多发生在距矿井水排放口1400 m的滨岸带内，滨岸土壤对矿井水中氮素的截留作用亦是滨岸土壤氮素空间分布异质性的主导因素。本研究结果可为指导矿井水排放路径的设计及矿井水资源的合理开发与利用提供指导。

关键词：矿井水；土壤氮素；滨岸带；空间分布

氮素是水体富营养化的主要限制性营养元素，过多的氮素可导致水体氮素营养失衡[1]，破坏水生生态系统物质与能量的流动，使整个水生态系统逐渐走向灭亡。河湖滨岸带是水陆衔接交替的过渡区域，可在陆源污染物流入河湖的过程中充当截留与缓冲带的作用[2]。滨岸带土壤氮素分布特征不仅对氮的截留功能产生影响，而且对水环境亦有直接影响。因此，研究不同滨岸带土壤氮素空间分布特征对河湖环境保护具有重要意义。研究表明，煤矿矿井水多存在富营养化问题，其中尤以氮素含量较高[3-4]。一直以来，矿井水多直接排放至邻近水域，大量氮素随矿井水的涌入而使水体富营养化，对矿区生态环境安全产生了直接的威胁[5-6]。近年来，针对滨岸缓冲带对陆源污染物净化效果的研究主要集中于农业方面[7-9]，而对于矿区水土非人为干预的生态净化机制与规律研究较少。

在我国西北干旱半干旱地区，矿产资源丰富，矿井水排放量大，水体营养丰富，水资源的合理开发与利用一直是该地区生态环境安全建设的研究重点之一。园疙瘩湖是典型的干旱区矿井水排放湖泊[10]，其水源主要来自于号称“西北第一矿”的羊场湾煤矿[11-12]，隶属于宁东能源基地，是全国十三个大型煤炭基地之一。园疙瘩湖位于宁夏灵武市宁东镇，其主要为矿井水大量涌入而形成的人工湖，面积约0.58 km^2，最大水深3 m，储水量约116×10^4 m^3，其水体氨氮含量约0.552 mg·L^{-1}，总氮含量约为0.671

收稿日期：2020-03-06； **修订日期：**2020-09-18
基金项目：国家重点研发计划“西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术”项目(2017YFC0504400)；“采煤迹地地形与新土体近自然构建技术研究”项目(2017YFC0504404)资助
作者简介：段文艳(1995-)，女，硕士研究生，主要从事森林保护研究. E-mail: 2086596903@qq.com
通讯作者：盛敏. E-mail: shengmin1977@126.com

$mg \cdot L^{-1}$,化学需氧量为V类水体,含盐量较高,无法直接利用[10]。因此,本文以园疙瘩湖为研究对象,通过分析园疙瘩湖滨岸带土壤氮素空间分布特征及其与矿井水排放口距离间的关系,确定滨岸带在矿井水排放过程中对氮素的截留和缓冲作用,为矿井水排放及矿井水资源的合理开发与利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏灵武市宁东镇羊场湾煤矿的矿井水排放地——园疙瘩湖(38°01′N,106°34′E,海拔1320 m)。羊场湾煤矿主要以井采为主,矿山废水多;园疙瘩湖位于羊场湾煤矿东南约2 km处,是由该矿场矿井水在10 a内大量涌入而形成的人工湖[10],是当地此类型较大的湖泊,其湖水pH约8.13,氨氮含量约0.552 $mg \cdot L^{-1}$,总氮含量约0.671 $mg \cdot L^{-1}$,总磷含量约0.025 $mg \cdot L^{-1}$。

园疙瘩湖地处鄂尔多斯高原西缘,流动沙丘风沙地貌,属温带大陆性荒漠草原区,干旱少雨[13];该湖滨岸成土母质多为砂岩风化物[14],其土壤质地为沙质土和疏松沙壤土,质地沙性大、结构松散、水稳团聚体小且持水保肥能力差[15],其植被主要以能耐旱、耐瘠薄的冰草和沙蒿为主[16]。总体来看,园疙瘩湖滨岸土壤质地及其植被类型与当地多数矿井水人工湖的生境基本一致,具有较强的代表性。

1.2 园疙瘩湖滨岸类型的划分

实地调查发现,在距园疙瘩湖中心由近及远出现了典型的冰草植被群向沙蒿植被群的演变,呈带状。沙蒿喜氮,随氮素的增加,沙蒿生物量和根冠比显著增加,其对水蚀风蚀条件下氮素的固定能力较强;冰草氮素利用能力有限,在氮素多的地方竞争力往往不如其他植株,但在含水量高的土壤中竞争能力较强。园疙瘩湖滨岸特殊植被带的分布表明矿井水的涌入对湖周围土壤理化性质产生了持续而稳定的影响。

根据河湖滨岸缓冲带结构特征与划分依据的相关研究结果[2,7,17-19],结合园疙瘩湖滨岸实际情况,以其湖岸典型优势植物及垂直湖岸的距离为依据,将园疙瘩湖滨岸划分为水滨区域(冰草为优势种)、近岸陆域(冰草和沙蒿混交)和自然区域(沙蒿为优势种)3种类型,且这3种滨岸类型沿湖呈典型带状分布。水滨区域为离湖最近的湿地,其优势植物为冰草;近岸陆域离湖稍远,其优势植物为冰草和沙蒿;自然区域离湖最远,其与近岸陆域相连但被认为是不受矿井水影响或影响极小的区域,优势植物为沙蒿(图1)。

1.3 样品采集

2017年10月,通过比对园疙瘩湖2005—2015年的卫星照片了解园疙瘩湖的大概形成过程,确定该湖滨岸的大致范围(图1a)。滨岸范围确定后,经野外实地踏查发现,园疙瘩湖滨岸离矿井水排放口(简称排水口)最近的部分多为泥潭,而离排水口最远的部分又多为黄沙所覆盖,故本研究选取距排水口270 ~ 2700 m的滨岸为本文的研究区域。

样地的设置以排水口为分界点,将所选研究区域分为南岸和北岸。南岸样地的设置:于南岸距排水口270 m处设置第1个南岸样地,随后采用随机方式设置地点,依此类推,南岸共设置9个样地;北岸样地的设置:北岸第一个样地设置于距排水口360 m处,其余样地的设置方法与南岸基本相同,共于北岸设置6个样地(北岸部分滨岸为黄沙所覆盖,所以样地设置较少);南岸和北岸共设置15个样地(图1b)。

样方的设置及土壤样品的采集:将各样地沿远离湖水的方向根据植被特征分为水滨区域(距湖岸边0 ~ 10 m的冰草植物带)、近岸陆域(距湖岸边40 ~ 60 m的冰草和沙蒿混交植物带)和自然区域(距湖岸边90 ~ 130 m的沙蒿植物带)3种滨岸类型(图1c),再于各滨岸类型中央设置一个10 m × 50 m的样方,共设置45个样方(15个样地 × 3种滨岸类型 = 45个样方)(图1d);在各样方内随机选择3个样点,再以样点为中心设置1个1 m × 1 m的小样方,小样方内植被需生长良好、分布均匀且盖度在50%以上,若个别小样方由于某些特殊原因(如动物啃噬或人为踩踏)导致植被生长不佳或破坏严重,则舍弃该小样方,继续设置新的小样方予以代替;各小样方内采用"S"形布点法选择代表性植株各3株(水滨区域:3株冰草;近岸陆域:冰草和沙蒿各3株;自然区域:3株沙蒿),以选定植株为中心在0~15 cm土层内采集直径为10 cm的土柱;将各样方内以同种植物为中心采集的土柱分别混合后作为本样方的代表性土壤样品。共采集60个土壤样品,其中15个采自水滨区域,30个采自近岸陆域,15个采自自然区域。将采集的各土壤样品分成两份,一份保存于4 ℃条件下,用于测定微生物量氮和土壤酶的活性;另一

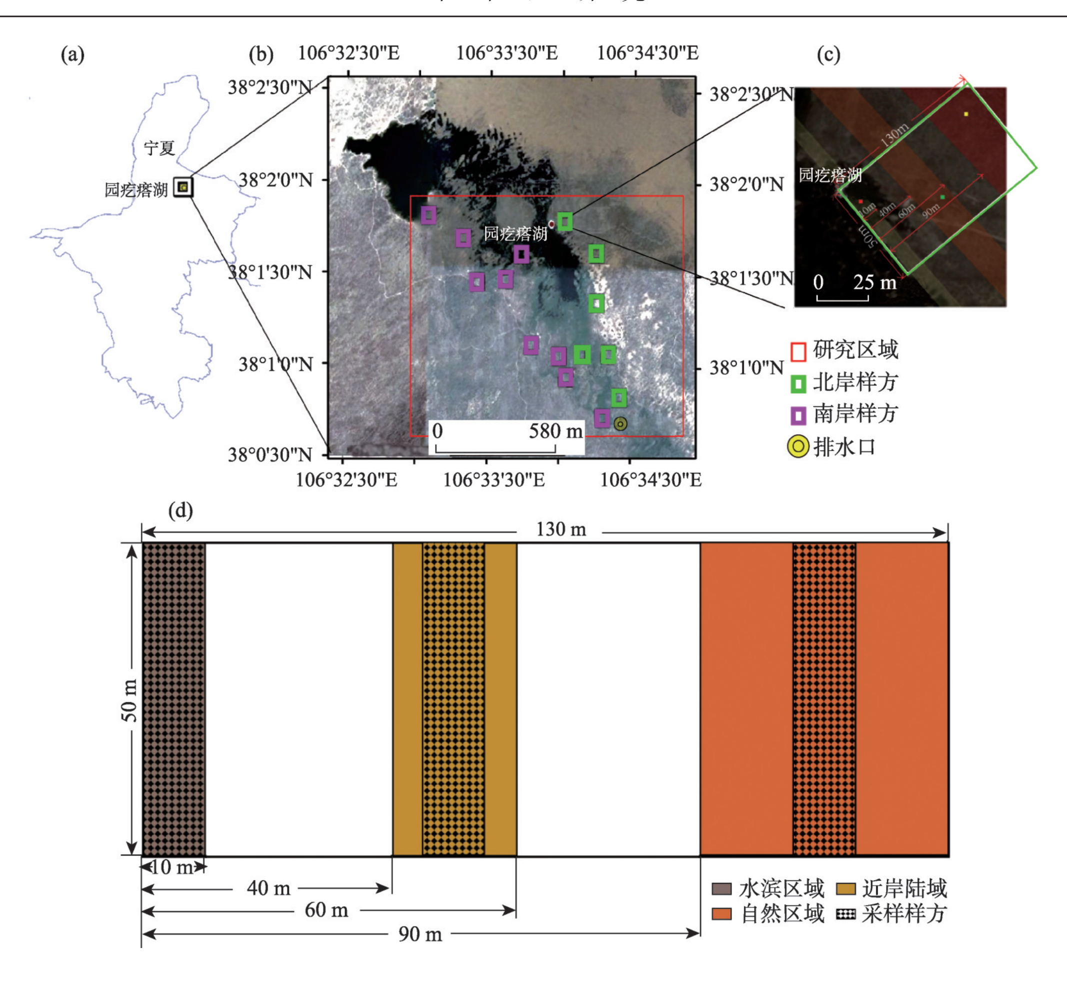


图1 园疙瘩湖滨岸类型的划分及采样点的布置

Fig. 1 The method of classifying shore types and selecting sampling sites in Yuangeda Lake

份风干后过2 mm筛于常温条件下保存，用于分析土壤理化性质和其他氮组分。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤氮素相关指标的测定 凯氏定氮法测定全氮[20]；AA3连续流动分析仪测定硝态氮和铵态氮[21]；熏蒸萃取法测定微生物量氮[22]；盐酸水解法测定氨基酸氮[23]。

可溶性有机氮的测定[21]：将土壤和水（水土比5:1）混合后以250 r·min^{-1}的速度振荡30 min，土壤悬液利用0.45 μm的滤膜过滤，再利用VarioTOC / TN仪测定滤液中的可溶性总氮；可溶性有机氮含量为可溶性总氮与无机氮（硝态氮和铵态氮含量之和）含量之差，即：无机氮=硝态氮+铵态氮；可溶性有机氮=可溶性总氮-无机氮。

采用Cambardella & Elliot[24]的方法测定颗粒物有机氮和非颗粒物有机氮。测定方法如下：将20 g风干土置于盛有100 mL浓度为5 g·L^{-1}六偏磷酸钠溶液的小白瓶中，以200 r·min^{-1}的速度震荡15 h后过53 μm的土壤筛，并利用自来水将筛上残留物冲洗干净（直至过滤液不再浑浊）；将收集的土壤过滤液于50 ℃下烘干，利用凯氏定氮法测定烘干土样中的全氮，即得颗粒物全氮的含量，颗粒物有机氮为颗粒物全氮与无机氮（硝态氮和铵态氮含量之和）含量之差；而非颗粒物有机氮则为总有机氮与颗粒物有机氮含量之差。

1.4.2 土壤酶活性的测定 采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶活性；采用加勒斯江法测定蛋白酶活性[25]。

1.4.3 滨岸带中氮素的变化系数 水滨区域对矿井水中氮素的截留效应=水滨区域N_i/自然区域N_i

近岸陆域对矿井水中氮素的截留效应=近岸陆域N_i/自然区域N_i

式中：N为氮素，可代表全氮、硝态氮、铵态氮、可溶性有机氮、非颗粒物有机氮、颗粒物有机氮、氨基酸氮和微生物量氮；i为采样区编号，其取值范围为1~15；N_i即为第i个采样区中某氮素的浓度。

若变化系数大于1(该滨岸带土壤氮素浓度大于周边自然区域),表明该滨岸带对该氮素具有选择积累作用;若变化系数小于或等于1(该滨岸带土壤氮素浓度小于或等于周边自然区域),表明该滨岸带对该氮素无选择积累作用。

1.5 统计分析

采用R语言的Vegan程序包对试验数据进行统计分析[26]。

2 结果与分析

2.1 园疙瘩湖滨岸土壤氮素的总体分布特征

采用Vegan程序包中的adonis()函数分析结果表明,与离湖最远的自然区域相比,园疙瘩湖水滨区域($P = 0.016$)和近岸陆域($P = 0.045$)的土壤氮素分布特征均发生了显著变化。进一步对水滨区域、近岸陆域和自然区域中的8种不同氮素含量进行主成分分析,分析结果表明:8个主成分因子的前2个主成分(PCA1和PCA2)对总方差的贡献率分别为40.64%和19.84%,贡献率之和达60%以上,能够反应数据的大量信息(图2);其中第一主成分(PCA1)的典型变量值在水滨区域、近岸陆域和自然区域间的差异达显著水平($P = 0.0019$);相比较而言,水滨区域与周边自然区域的土壤氮素分布特征差异较大,而近岸陆域与周边自然区域的差异较小;8个氮素指标根据其对第一主成分的贡献率从大到小为:全氮、可溶性有机氮、颗粒物有机氮、非颗粒物有机氮、氨基酸氮、铵态氮、微生物量氮和硝态氮(图2)。这一结果表明水滨区域和近岸陆域与自然区域土壤氮素分布特征相比均发生了显著变化,且这一变化主要与土壤全氮和有机氮的变化有关。已有研究表明土壤全氮含量主要受有机氮的影响,而土壤有机氮的矿化又与土壤水分条件有关[27];本研究中,随着离湖岸距离的增加,园疙瘩湖中蓄存的矿井水对湖滨岸土壤全氮和有机氮含量的影响力呈下降趋势,该影响力的下降可能是导致水滨区域、近岸陆域和自然区域土壤氮素分布特征呈现空间异质性的主要因素。

一些研究认为植物吸收是影响土壤氮素的重要因素之一[28-29];而本研究却发现(MANOVA分析),水滨区域、近岸陆域和周边自然区域内土壤氮素分布特征主要与其离湖水的距离有关($P = 0.027$),而与其植被类型无关($P = 0.36$)。导致这一差异的原因可能是:在园疙瘩湖滨岸这一自然生态系统中,土壤氮素可被植物吸收利用而损失,然而损失的氮素又会随着植物组织的衰老、凋落、腐解而回归土壤[30-32],使土壤氮素得以补充。该结果进一步确认了园疙瘩湖中蓄存的矿井水为其滨岸土壤氮素空间异质性的主导因素。

2.2 水滨区域对矿井水中氮素的截留效应

方差分析结果表明,与周边自然区域相比,水滨区域土壤全氮、可溶性有机氮、颗粒物有机氮及氨基酸氮的含量较高,铵态氮的含量较低,而其他

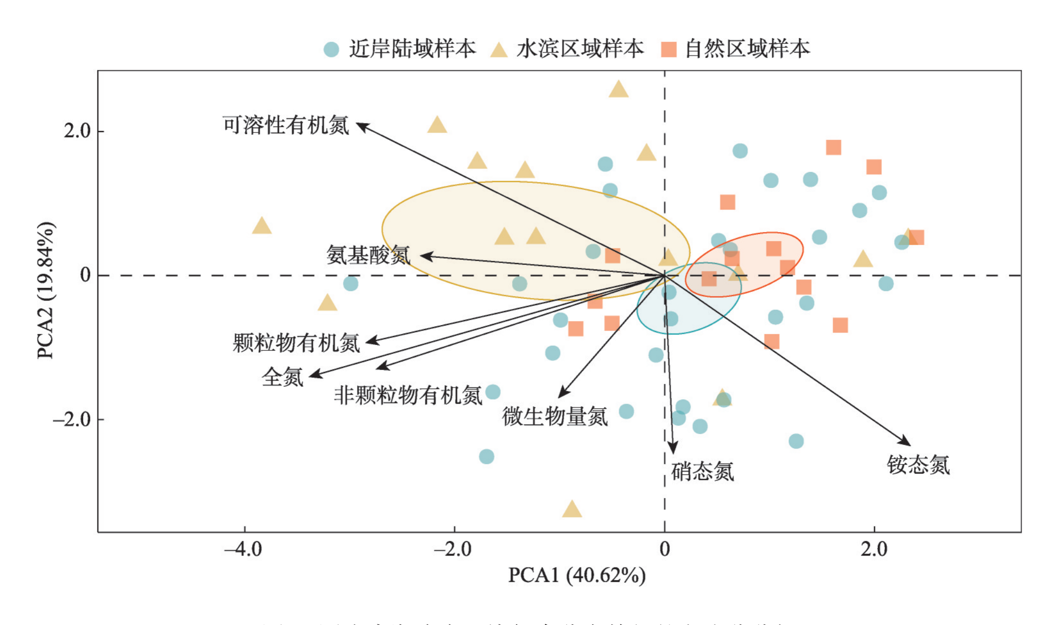


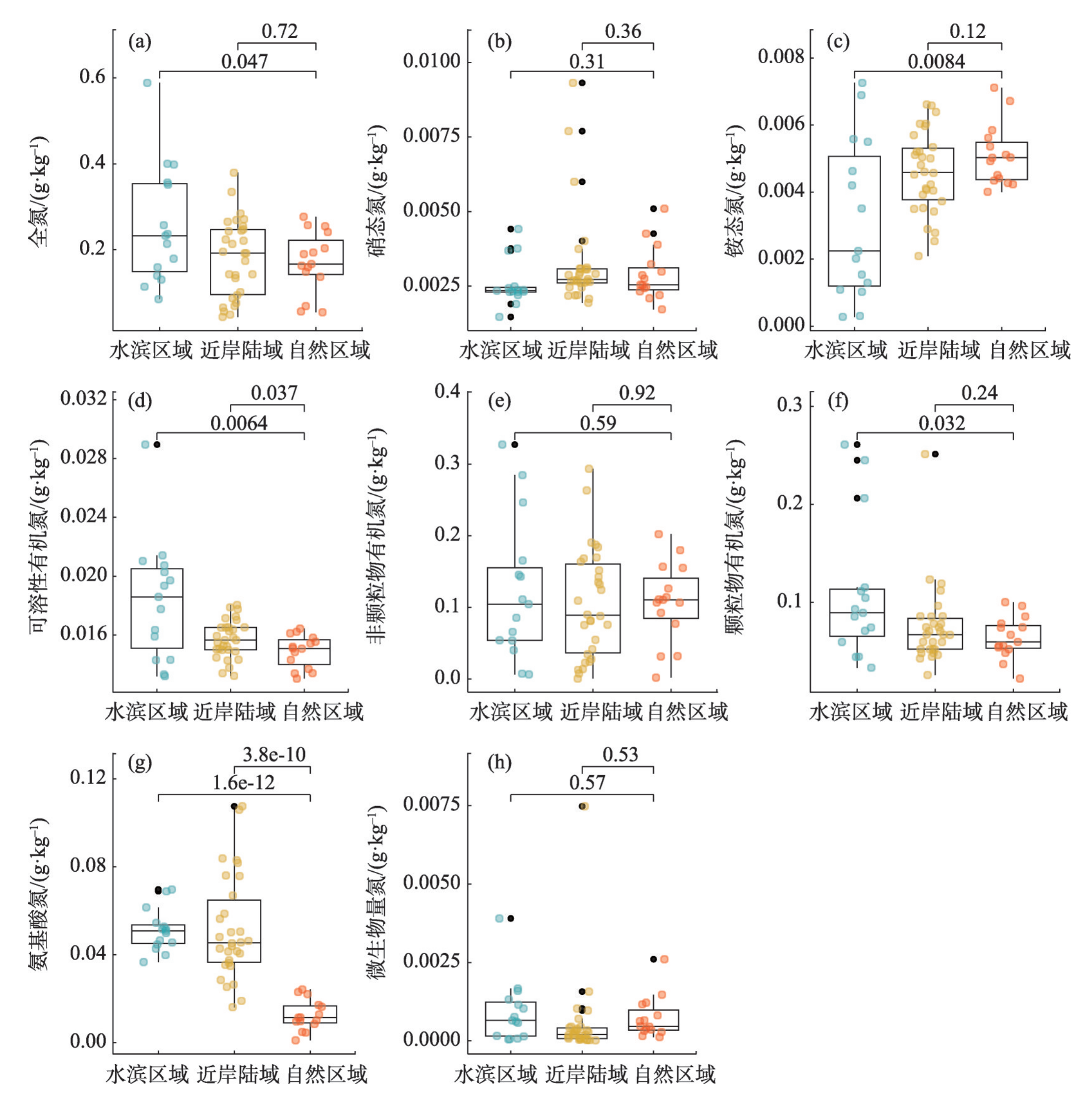
图2　园疙瘩湖滨岸土壤氮素分布特征的主成分分析

Fig. 2　Principal component analysis (PCA) of soil nitrogen-distribution characteristics in Yuangeda Lake

氮素指标则无显著性变化(图3)。由此可知,水滨区域对矿井水中可溶性有机氮、颗粒物有机氮及氨基酸氮具有截留效应,而对其他氮素无截留效应。

已有研究表明,物理沉降是滨岸带截留氮素的重要作用之一[33-35],附于颗粒物上的氮素随径流长距离运输过程中,不断进行沉降吸附,水域流程是纵向空间维度影响氮沉降的重要因素;径流在进入植被根系固持的滨岸缓冲带土壤时,径流中的颗粒物更易发生沉淀,吸附态、颗粒态氮随之固持在滨岸带上,可以说是氮沉降截留的横向因素。受水域流程的纵向空间维度和氮素形态横向因素的综合影响,距矿井水排放口距离的不同可能会导致滨岸带对不同氮素形态产生不同的截留效应。为此,本文采用回归分析方法分别分析了水滨区域内土壤全氮、可溶性有机氮、颗粒物有机氮和氨基酸氮的变化系数与其距矿井水排放口距离间的关系,以回归系数的平方(r^2)作为主要参数,同时对回归方程亦进行了显著性检验($P < 0.05$)。

回归分析结果表明,水滨区域对全氮、颗粒物有机氮和氨基酸氮的截留效应与其离矿井水排放口的距离呈显著相关性($P < 0.05$),而水滨区域对可溶性有机氮的截留效应与其离矿井水排放口的距离无显著相关性($P = 0.80$)(图4)。具体而言,水滨区域对全氮和颗粒物有机氮的截留效应随其离矿井水排放口距离的增大而逐渐降低,而对氨基酸氮的截留效应则在距矿井水排放口0~1400 m的范围



注:横线上的数值为表征滨岸类型间氮素浓度差异的P值(t检验),P小于0.05表示差异达显著水平。下同。

图3 水滨区域或近岸陆域与自然区域土壤氮素含量的差异

Fig. 3 The difference of soil nitrogen concentrations in waterfront or nearshore areas as compared to natural areas

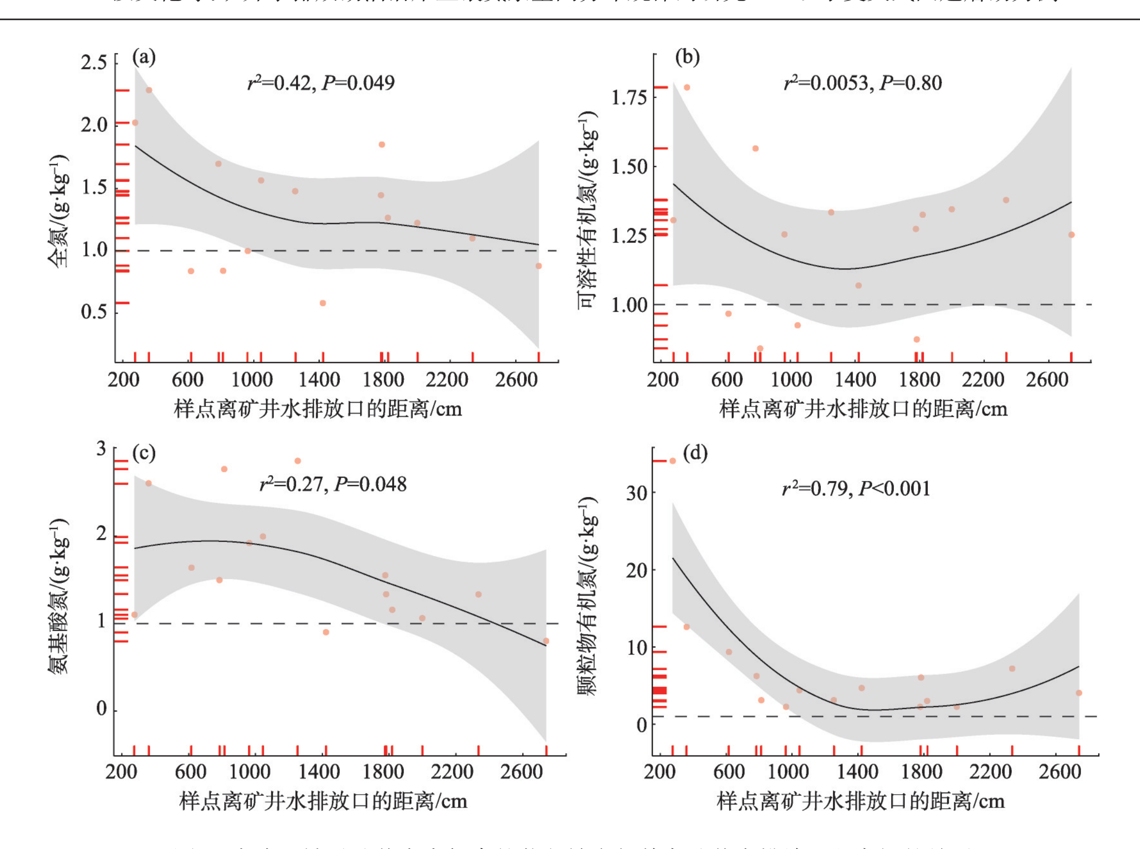


图4 水滨区域对矿井水中氮素的截留效应与其离矿井水排放口距离间的关系

Fig. 4 Relationship between the blocking influence of waterfront areas on soil nitrogen in mine water and their distance from mine water discharge

内呈下降趋势，在1400 m以后则基本趋于稳定(图4)。这一研究结果表明，受水域径流纵向截留的影响，矿井水中全氮、颗粒物有机氮和氨基酸氮可能随距排水口距离的增加而减少，从而导致水滨区域对全氮、颗粒物有机氮和氨基酸氮的截留效应随其距矿井水排放口距离的增而加逐渐降低;研究结果同时还表明，滨岸带截留不同形态氮素所需滨岸长度存在一定差异，这可能与不同形态氮素的迁移性有关。

2.3 近岸陆域对矿井水中氮素的截留效应

方差分析结果表明，与周边自然区域相比，近岸陆域土壤中可溶性有机氮和氨基酸氮的含量较高，而其他氮素指标均无显著变化(图3)。由此可知，近岸陆域仅对矿井水中可溶性有机氮和氨基酸氮具有截留效应。

为揭示水域流程的纵向空间维度和氮素形态横向因素对氮素截留效应的综合影响，利用回归分析方法分别分析了近岸陆域中可溶性有机氮和氨基酸氮的变化系数与其距矿井水排放口距离间的关系，以回归系数的平方(r^2)作为主要参数，并对其回归方程进行了显著性检验($P < 0.05$)。回归分析结果表明，近岸陆域对可溶性有机氮的截留效应与其距矿井水排放口的距离无关($P = 0.054$)，而对氨基酸氮的截留效应与其距矿井水排放口的距离呈显著相关性($P < 0.001$)。具体而言，近岸陆域对氨基酸氮的截留效应在距矿井水排放口0~1400 m的范围内呈下降趋势，而在1400 m以后则基本趋于稳定(图5)。渗透速率是影响溶解性氮素滨岸截留效应的重要条件[36-38]。园疙瘩湖水域砂质土壤的疏松结构更有利于水体下渗，加之缓冲带内植被的凋落层，均可促进溶解性氮随水渗透到更深层土壤，降低了可溶性氮素随地表径流的迁移能力，因此，近岸陆域对可溶性有机氮的截留效应与距矿井水排放口的距离未表现出明显的相关性。氨基酸氮的变化系数在近岸陆域和水滨区域表现出相同的变化趋势，可能是因为水滨区域对氨基酸氮的截留效应有限，近排水口的氨基酸氮含量较多，需近岸陆域和水滨区域协同作用才可完成对水体中氨基酸氮的截留。

2.4 园疙瘩湖滨岸土壤酶的活性

对滨岸区域土壤酶活性进行方差分析，结果表明与周边自然区域相比，水滨区域和近岸陆域土壤中蛋白酶和脲酶的活性均无显著变化(图6)。这一

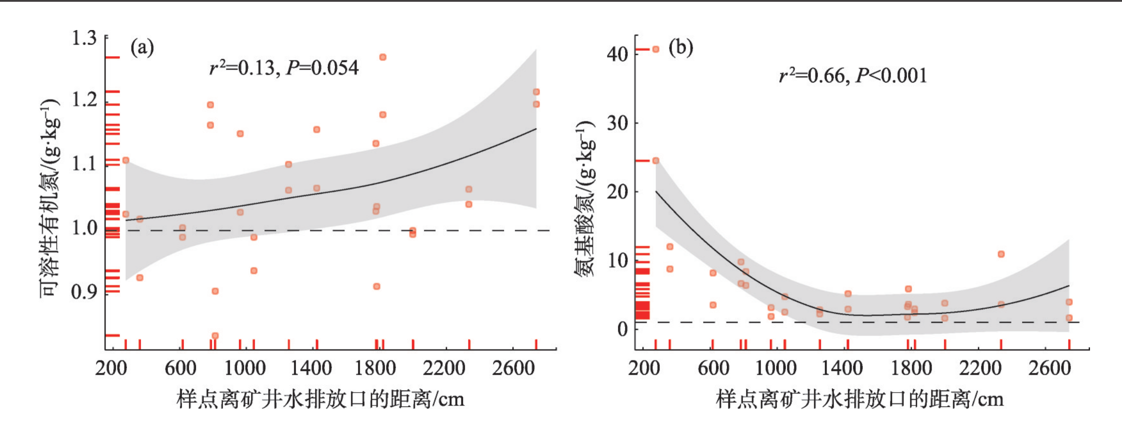


图5 近岸陆域对矿井水中氮素的截留效应与其离矿井水排放口距离间的关系

Fig. 5 Relationship between the blocking influence of nearshore areas on soil nitrogen in mine water and their distance from mine water discharge

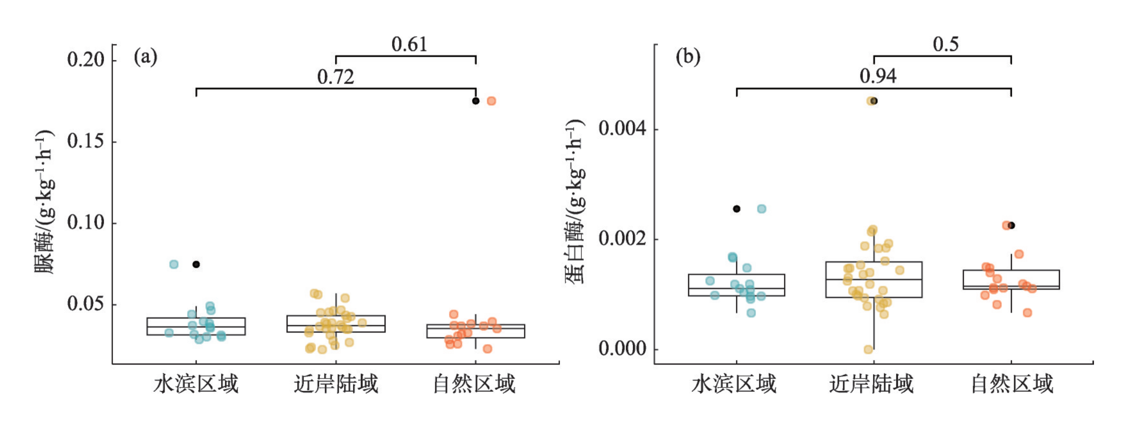


图6 水滨区域或近岸陆域与自然区域土壤酶活性和微生物量氮的差异

Fig. 6 The difference of soil enzyme activities in waterfront or nearshore areas as compared to natural areas

结果表明,水滨区域和近岸陆域对矿井水中氮素的截留效应与土壤酶活性无关。

3 讨 论

大量研究表明,土壤氮素分布特征受气候、植被、地形、农耕、水体等众多因素的影响[39-41]。一般研究认为,在地形相对一致的自然非农耕流域,植被类型和水体均是导致土壤氮素空间异质性的重要因素[42-44]。本文的研究区域地处鄂尔多斯高原西缘,流动沙丘风沙地貌,属温带大陆性荒漠草原区,干旱少雨,土壤类型为风沙土,其周边自然区域的植被也主要以能耐旱、耐瘠薄的冰草和沙蒿为主[16]。经实地踏查发现,从周边自然区域到距园疙瘩湖最近的水滨区域,植被类型从以沙蒿为主的植被类型逐渐演替为以冰草为主的植被类型。研究发现,园疙瘩滨岸植被演替对土壤氮素分布特征并无显著影响,而其土壤氮素分布特征主要与其距湖水的距离有关。这一结果表明,园疙瘩湖中蓄存的矿井水应为其滨岸土壤氮素空间异质的主导因素。

土壤氮素形态可分为有机态和无机态两大类[45]。有机态氮是指结合有机物中的氮素,约占土壤全氮的90%以上[46-47]。土壤有机态氮主要包括可溶性有机氮、颗粒物有机氮、非颗粒物有机氮、氨基酸氮及微生物量氮等[48-49]。本研究发现,水滨区域土壤全氮、可溶性有机氮、颗粒物有机氮和氨基酸氮及近岸陆域土壤中可溶性有机氮和氨基酸氮含量显著高于周边自然区域。这一结果表明,矿井水中颗粒物有机氮已基本被截留于水滨区域,而可溶性有机氮和氨基酸氮则可能由于其迁移性较强而需要更为宽阔的缓冲或截留区域,这与丁咸庆等[50]的研究结果一致。

本研究发现水滨区域和近岸陆域土壤对矿井水中可溶性有机氮的截留效应与其离矿井水排放

口的距离无关,究其原因可能是因为可溶性有机氮的易溶解特性导致可溶性有机氮随水体的迁移性较强[51-52],滨岸带土壤虽在吸附和缓存可溶性有机氮中发挥了一定的作用,但其较强的迁移性导致其在滨岸带土壤的分布较为均一。本研究还发现水滨区域土壤对矿井水中全氮和颗粒物有机氮的截留效应随其距矿井水排放口距离的增大而逐渐降低,尤以0～1400 m的范围内较高;水滨区域和近岸陆域土壤对矿井水中氨基酸氮的截留效应则在距矿井水排放口0～1400 m的范围内呈下降趋势,在1400 m以后则基本趋于稳定;究其原因可能是因为颗粒物有机氮和氨基酸氮大部分以颗粒物或以氨基酸、肽、蛋白质类-有机胶体结合态存在于悬浮颗粒表面或晶格中[53-54],其在随水体长距离的迁移中逐渐沉降吸附于土壤表面,该沉降和吸附过程可在距矿井水排放口1400 m左右的滨岸带内基本完成。

无机态氮一般多指铵态氮和硝态氮,约占土壤全氮的1%[55]。在北方的碱性土壤中,铵态氮是无机态氮的主要存在形式[56],其含量也较高[57]。土壤中的铵态氮主要来源于土壤中有机氮矿化[58-59]、大气中NH_4^+干湿沉降[60-61]以及土壤矿物晶格中固定态铵[62]的释放等。本研究发现,园疙瘩湖中蓄存的矿井水导致水滨区域内土壤铵态氮含量下降,且其降低效应与其离矿井水排放口的距离无关。究其原因可能主要包括以下两个方面,其一:矿井水中的氮主要为有机态氮,无机态氮在滨岸土壤中的累积量有限[63];其二:矿井水中可能存在一些物质降低了与有机氮矿化有关的微生物活性[64],阻碍了有机氮的矿化进程,使土壤铵态氮的来源受阻。

本研究发现水滨区域和近岸陆域中土壤氮素空间异质性与土壤酶活性无关。土壤酶活性是反映土壤养分转化强弱的重要指标[65-66],脲酶和蛋白酶是参与土壤氮素矿化的重要酶类[67-68]。研究表明,利用矿井水灌溉会导致脲酶、蔗糖酶活性降低[69]。本研究却发现,与周边自然区域相比,水滨区域和近岸陆域土壤中蛋白酶和脲酶活性并无显著性变化,分析原因可能是因为滨岸区域微生物量氮无显著变化所致。微生物量氮是实现土壤氮素矿化的关键[70]。在土壤矿化过程中,微生物通过调控蛋白酶和脲酶等与矿化作用相关的酶来控制矿化作用,微生物量与土壤氮素矿化有关的酶活性密切相关,微生物生物量的降低势必会导致土壤酶活性的下降,从而使土壤氮矿化速率降低[71]。

4 结 论

(1) 园疙瘩湖中蓄存的矿井水是滨岸土壤氮素空间异质的主导因素,其中土壤有机氮的空间异质性最为明显。

(2) 矿井水中颗粒物有机氮已基本被截留于水滨区域,而可溶性有机氮和氨基酸氮则需要更为宽阔的截留区域。

(3) 水滨区域土壤对矿井水中颗粒物有机氮的截留效应随其距矿井水排放口距离的增大而逐渐降低;滨岸(水滨区域和近岸陆域)土壤对矿井水中可溶性有机氮的截留效应与其距矿井水排放口的距离无关;滨岸土壤对矿井水中氨基酸氮的截留效应在距矿井水排放口0~1400 m的范围内随距离增加呈下降趋势,在1400 m以后则基本趋于稳定。

(4) 滨岸土壤氮素的空间异质性与土壤酶活性无关。

参考文献(Reference):

[1] 徐若冰. 湖泊水体富营养化的来源、危害及治理研究[J]. 环境与发展, 2019, 31(4): 56-58. [Xu Ruobing. Sources, hazards and treatment of lake eutrophication[J]. Environment and Development, 2019, 31(4): 56-58.]

[2] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 139-144. [Qian Jin, Wang Chao, Wang Peifang, et al. Research progress on the mechanism and suitable width of river bank buffer zone[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 139-144.]

[3] 刘宏, 吴攀. 高砷煤矿废水灌溉土壤中砷的垂直分布特征[J]. 干旱环境监测, 2014, 28(2): 55-59. [Liu Hong, Wu Pan. Vertical distribution characteristics of arsenic in the soils irrigated by high-arsenic coal drainage[J]. Arid Environmental Monitoring, 2014, 28(2): 55-59.]

[4] Wilson B, Lang B, Pyatt F B. The dispersion of heavy metals in the vicinity of Britannia Mine, British Columbia, Canada[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(3): 269-276.

[5] Chlot S, Widerlund A, Björn Öhlander. Nitrogen uptake and cycling in *Phragmites australis* in a lake-receiving nutrient-rich mine water: A ^{15}N tracer study[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 6027-6038.

[6] Zhang Y K, Xiong Z S, Yang L M, et al. Successful isolation of a tolerant co-flocculating microalgae towards highly efficient nitrogen removal in harsh rare earth element tailings (REEs) wastewater[J]. Water Research, 2019, 166: 115076.

[7] 于子铖, 王琦, 赵进勇, 等. 生态清洁小流域三道防线小尺度划分方法研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(7): 103-106. [Yu Zicheng, Wang Qi, Zhao Jinyong, et al. Research on small-scale division method of three lines of defense in ecologically clean small watershed[J]. Yellow River, 2019, 41(7): 103-106.]

[8] 雷呈, 黄琪, 倪才英, 等. 袁河流域河流生境质量评价及其影响因素分析[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2019, 43(4): 425-432. [Lei Cheng, Huang Qi, Ni Caiying, et al. River habitat quality evaluation and analysis of influencing factors in the Yuan river basin[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2019, 43(4): 423-432. 〕

[9] 唐丹, 张展羽, 夏继红, 等. 鄱阳湖滨岸带对N素的净化及其影响因素[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 85-90. [Tang Dan, Zhang Zhanyu, Xia Jihong, et al. Purification of N and its influencing factors in the coastal zone of Poyang Lake[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 85-90.]

[10] 韩秀云, 李聪. 宁东基地水环境状况及水资源综合利用初探[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 278-282. [Han Xiuyun, Li Cong. Present situation of water environment and the comprehensive utilization of water resources in Ningdong base[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 278-282.]

[11] 赵亚, 王磊. 宁东煤田羊场湾煤矿地质构造特征浅析[J]. 科技展望, 2015, 25(29): 101-102. [Zhao Ya, Wang Lei. Analysis of geological structure features of Yangchangwan coal mine in Ningdong coal field[J]. Science and Technology Outlook, 2015, 25(29): 101-102.]

[12] 任瑞, 牟才霞, 海连福, 等. 鄂尔多斯盆地西缘羊场湾煤矿延安组煤层特征及控制因素研究[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(10): 55-58, 62. [Ren Rui, Mu Caixia, Hai Lianfu, et al. Study on steam features and control factors of Yan'an formation in Yangchangwan mine in western margin of the Ordos Basin[J]. Coal and Chemical Industry, 2018, 41(10): 55-58, 62.]

[13] 白壮壮, 崔建新, 丁晓辉. 1986—2015年鄂尔多斯高原沙漠化及其驱动因素研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 749-756. [Bai Zhuangzhaung, Cui Jianxin, Ding Xiaohui. Desertification and its driving factors in the Ordos Plateau, from 1986 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 749-756.]

[14] 张秀珍, 刘秉儒, 詹硕仁. 宁夏境内12种主要土壤类型分布区域与剖面特征[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(9): 48-50, 63. [Zhang Xiuzhen, Liu Bingru, Zhan Shuoren. Distribution area and profile characteristics of 12 main soil types in Ningxia[J]. Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2011, 52(9): 48-50, 63.]

[15] 周玉喜. 宁夏羊场湾煤矿水土保持设施及其技术评估[J]. 水土保持通报, 2007, 27(5): 114-115. [Zhou Yuxi. Soil and water conservation facilities and technical assessment of Yangchangwan coal mine in Ningxia[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(5): 114-115.]

[16] 杜灵通, 徐友宁, 宫菲, 等. 宁东煤炭基地植被生态特征及矿业开发对其的影响[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2215-2223. [Du Lingtong, Xu Youning, Gong Fei, et al. Characteristics of vegetation and ecology in Ningdong coal base and the effects of mining activities[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(12): 2215-2223.]

[17] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 基于层次分析法的河湖滨岸缓冲带宽度适宜性评价[J]. 水资源保护, 2008, 24(6): 76-79. [Qian Jin, Wang Chao, Wang Peifang, et al. Evaluation of width suitability of riparian buffer strip based on analytic hierarchy process [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(6): 76-79.]

[18] 孙金伟, 许文盛. 河岸植被缓冲带生态功能及其过滤机理的研究进展[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 40-44. [Sun Jinwei, Xu Wensheng. Research advances in ecological functions and filtration mechanism of riparian buffer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 40-44.]

[19] 曹宏杰, 焉志远, 杨帆, 等. 河岸缓冲带对氮磷污染消减机理及其影响因素研究进展[J]. 国土与自然资源研究, 2018(3): 46-50. [Cao Hongjie, Yan Zhiyuan, Yang Fan, et al. The review on removal mechanism of nitrogen and phosphorus pollutant and its influencing factors of riparian buffer strips[J]. Territory & Natural Resources Study, 2018(3): 46-50.]

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil Agricultural Chemical Analysis[M]. Bejing: China Agricultural Press, 2000.]

[21] 牛颖权, 李军, 杨曦, 等. 天津盐渍化土壤水溶性氮素组成及分布特征[J]. 地球与环境, 2016, 44(2): 169-176. [Niu Yingquan, Li Jun, Yang Xi, et al. Composition and distribution characteristics of water-soluble nitrogen in saline soil of Tianjin[J]. Earth and Environment, 2016, 44(2): 169-176.]

[22] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986. [Xu Guanghui, Zheng Hongyuan. Soil Microbial Analysis Methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.]

[23] 武雪萍, 王小彬, 查燕, 等. 施肥对土壤腐殖质总碳和氨基酸氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 43-49. [Wu Xueping, Wang Xiaobin, Zha Yan, et al. Effects of fertilization on total carbon and amino acid nitrogen content of soil humus[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(6): 43-49.]

[24] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society America Journal, 1992, 56(3): 777-783.

[25] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. [Guan Songyin. Soil Enzymes and Research Methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.]

[26] Oksanen J, Blanchet G F, Kindt R, et al. Vegan: Community Ecology Package. R Package Version 2.0-10[EB/OL]. 2013. [2016-10-25]. http: //CRAN. R-project. org /package = vegan.

[27] 熊汉锋, 王运华. 梁子湖湿地土壤养分的空间异质性[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 584-589. [Xiong Hanfeng, Wang Yunhua. Spatial variability of soil nutrients in wetland of Liangzi Lake [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 584-589.]

[28] Zhang Dandan, Jiao Feng, Yang Fan, et al. Shift in functional

plant groups under flooding impacted ecosystem C and N dynamics across riparian zones in the Three Gorges of China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 724: 138302.

[29] 马瑞, 赵锦梅. 东祁连山河谷高寒草地植被群落特征及其与土壤性状的关系[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 374−381. [Ma Rui, Zhao Jinmei. Relationship between the grassland and soil conditions in the Eastern Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 374−381.]

[30] Franklin H M, Carroll A R, Chen C R, et al. Plant source and soil interact to determine characteristics of dissolved organic matter leached into waterways from riparian leaf litter[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 703: 134530.

[31] Yu M F, Tao Y X, Liu W Z, et al. C, N, and P stoichiometry and their interaction with different plant communities and soils in subtropical riparian wetlands[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(1): 1024−1034.

[32] 赵海燕, 张剑, 刘冬, 等. 不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 618−626. [Zhao Haiyan, Zhang Jian, Liu Dong, et al. Characteristics and determining factors for ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in different marsh wetlands[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 618−626.]

[33] Bellmore R A, Compton J E, Brooks J R, et al. Nitrogen inputs drive nitrogen concentrations in U. S. streams and rivers during summer low flow conditions[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1349−1359.

[34] Musolff A, Selle B, Büttner O, et al. Unexpected release of phosphate and organic carbon to streams linked to declining nitrogen depositions[J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 1891−1901.

[35] Thorjørn L, Duan L, Jan M. Deposition and leaching of sulfur, nitrogen and calcium in four forested catchments in China: Implications for acidification[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(4): 1192−1198.

[36] Mankin K R, Ngandu D M, Barden C J, et al. Grass−shrub riparian buffer removal of sediment, phosphorus, and nitrogen from simulated runoff[J]. Journal of The American Water Resources Association, 2007, 43(5): 1108−1116.

[37] Welsh M K, Vidon P G, McMillan S K. Stream and floodplain restoration impacts riparian zone hydrology of agricultural streams[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(4): 90−98.

[38] Qin Y B, Chen Z H, Ding B J, et al. Impact of sand mining on the carbon sequestration and nitrogen removal ability of soil in the riparian area of Lijiang River, China[J]. Environmental Pollution, 2020, 261: 114220.

[39] 高涵, 肖礼, 牛丹, 等. 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3825−3832. [Gao Han, Xiao Li, Niu Dan, et al. Effects of converting farmland into forest and grassland on soil nitrogen component and conversion enzyme activity in the mountainous area of southern Ningxia [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3825−3832.]

[40] 梁美霞, 陈志彪, 姜超, 等. 崩岗区不同植被覆盖度对土壤氮素含量的影响[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 81−85. [Liang Meixia, Chen Zhibiao, Jiang Chao, et al. Effects of different vegetations on soil nitrogen in Benggang zone[J]. Ecological Science, 2018, 37(4): 81−85.]

[41] 刘郁林, 刘用刚, 林世滔, 等. 鄱阳湖湿地蚌湖浅层土壤氮素含量的梯度特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 263−267. [Liu Yulin, Liu Yonggang, Lin Shitao, et al. Gradient characteristics of nitrogen content in shallow soil of Poyang Lake wetland[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(11): 263−267.]

[42] 潘志华, 罗扬, 谭伟, 等. 白水河小流域不同植被类型间土壤养分的差异性及其空间变异研究[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(1): 15−23. [Pan Zhihua, Luo Yang, Tan Wei, et al. Differences of soil nutrients and their spatial variation among different vegetation types in Baishuihe small watershed[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2019, 38(1): 15−23.]

[43] 杨合龙, 戎郁萍, 穆蓁. 不同放牧强度下羊草+大针茅草地植被与土壤氮素的空间异质性分析[J]. 草业科学, 2016, 33(6): 1035− 1043. [Yang Helong, Rong Yuping, Mu Zhen. Analysis of spatial heterogeneity of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* vegetation and soil nitrogen under different grazing intensities[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(6): 1035−1043.]

[44] 苏芝屯, 吴春燕, 何彤慧, 等. 银川平原草甸湿地土壤养分特征与植物响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 816−823. [Su Zhitun, Wu Chunyan, He Tonghui, et al. Soil nutrient characteristics and plant response in meadow wetland in the Yinchuan Plain[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 816−823.]

[45] 丛日环, 张丽, 鲁艳红, 等. 添加不同外源氮对长期秸秆还田土壤中氮素转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1107−1114. [Cong Rihuan, Zhang Li, Lu Yanhong, et al. Effect of adding different exogenous nitrogen sources on nitrogen transformation in long− term straw incorporated soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(7): 1107−1114.]

[46] 朱兆良. 土壤中氮素的转化和移动的研究近况[J]. 土壤学进展, 1979, 7(2): 1− 16. [Zhu Zhaoliang. Recent research on nitrogen transformation and movement in soil[J]. Advances in Soil Science, 1979, 7(2): 1−16.]

[47] 刘俊第, 刘骏, 胡亚林, 等. 植被恢复对红壤侵蚀区土壤氮组分的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 115−123. [Liu Jundi, Liu Jun, Hu Yalin, et al. Effect of vegetation restoration on soil nitrogen fractions in eroded red soil area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 115−123.]

[48] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候−土壤−作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 507−515. [Cheng Yi, Zhang Jinbo, Cai Zucong. Key role of climate− soil− crop nitrogen conformation in nitrogen management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 507−515.]

[49] 郭康莉, 郑江, 冀拯宇, 等. 连续施用无害化污泥堆肥对沙质潮土活性有机氮组分的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1960−1968. [Guo Kangli, Zheng Jiang, Ji Zhengyu, et al. Effects

of consecutive application of composted sewage sludge on active organic nitrogen fractions in the sandy fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1960-1968.]

[50] 丁咸庆. 亚热带典型森林土壤有机氮、可溶性和溶解性有机氮(SON/DON)特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016. [Ding Xianqing. Characteristics of Soil Organic Nitrogen, Soluble and Dissolved Organic Nitrogen (SON/DON) in Typical Subtropical Forest Soils[D]. Changsha: Central South University of Forestry And Technology, 2016.]

[51] Perakis S S, Hedin L O. Nitrogen loss from unpolluted south American forests mainly via dissolved organic compounds[J]. Nature, 2002, 415(6870): 416-419.

[52] Valdemarsen T, Quintana C O, Flindt M R, et al. Organic N and P in eutrophic fjord sediments- rates of mineralization and consequences for internal nutrient loading[J]. Biogeosciences, 2015, 12 (6): 1765-1779.

[53] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 403- 409. [Xu Yangchun, Shen Qirong, Mao Zesheng. Contents and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions afterl long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(4): 403-409.]

[54] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1992. [Zhu Zhaoliang, Wen Qixiao. Soil Nitrogen in China [M]. Jiangsu: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.]

[55] 赵晓芳, 黄明斌. 黄土高原王东沟小流域土壤表层氮的空间分布[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 62-67. [Zhao Xiaofang, Huang Mingbin. Spatial distribution of nitrogen of topsoil in the Wangdonggou watershed of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 62-67.]

[56] 王昂, 戴丹超, 马旭洲, 等. 北方稻蟹共作对水体氮素淋溶损失的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(3): 332-342. [Wang Ang, Dai Danchao, Ma Xuzhou, et al. Effects of rice-crab culture on nitrogen leaching in rice fields in the north of China[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2019, 45(3): 332-342.]

[57] 刘晨阳, 陶宝先, 董杰, 等. 不同形态氮输入对黄河三角洲芦苇湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. 滨州学院学报, 2019, 35(2): 57-66. [Liu Chenyang, Tao Baoxian, Dong Jie, et al. Effects of different forms of nitrogen input on soil organic carbon mineralization of reed wetland in the Yellow River Delta[J]. Journal of Binzhou University, 2019, 35(2): 57-66.]

[58] 区惠平, 沈方科, 陈秋实, 等. 免耕和稻草还田对稻田土壤氮素转化强度的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 877-882. [Qu Huiping, Shen Fangke, Chen Qiushi, et al. Effects of no- tillage and straw returning on soil nitrogen intensities in paddy fields[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(4): 877-882.]

[59] 韩晓阳. 茶树根际土壤氨氮转化菌的分离、鉴定及效应研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. [Han Xiaoyang. Isolation, Identification and Effect of Ammonia Nitrogen Converting Bacteria in Tea Rhizosphere Soil[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013.]

[60] 解成杰, 郭雪莲, 余磊朝, 等. 滇西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7782-7787. [Xie Chengjie, Guo Xuelian, Yu Leichao, et al. Net nitrogen mineralization in soils of Napahai wetland in Northwest Yunnan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24) : 7782-7787.]

[61] 吕凤玲, 欧阳炜, 宋艳畋, 等. 狗牙根与空心莲对水库消落带土壤氮磷释放影响的模拟[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 240-245. [Lyu Fengling, Ou Yangwei, Song Yankan, et al. Simulation study on the effects of *Cynodon dactylon* and *Alternanthera philoxeroides* on soil nitrogen and phosphorus release in the reservoir water-level fluctuation zone[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 240-245.]

[62] 李一凡, 王玉杰, 王彬, 等. 西南酸雨区重庆缙云山常绿阔叶林土壤氮矿化特征[J]. 林业科学, 2019, 55(6): 1-12. [Li Yifan, Wang Yujie, Wang Bin, et al. Soil nitrogen mineralization characteristics of evergreen broad-leaved forest in Jinyun mountain in Chongqing in the acid rain zone, Southwest China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(6): 1-12.]

[63] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1439-1445. [Wang Lingling, Sun Zhigao, Mu Xiaojie, et al. Distribution of soil nitrogen in different types of wetlands in the tidal flat of the Yellow River Estuary[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(6): 1439-1445.]

[64] 范梦雨. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响探讨[J]. 低碳世界, 2018(1): 19-20. [Fan Mengyu. Effects of reclaimed water irrigation on soil properties and soil microorganisms[J]. Low Carbon World, 2018(1): 19-20.]

[65] 周晓兵, 张元明, 陶冶, 等. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3340-3349. [Zhou Xiaobing, Zhang Yuanming, Tao Ye, et al. Responses of soil enzyme activities and microbial biomass N to simulated N deposition in Gurbantunggut Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3340-3349.]

[66] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 621-629. [Yu Delang, Lei Zeyong, Zhang Yansong, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvestris* var. mongolica plantation in Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 621-629.]

[67] 张恩平, 谭福雷, 王月, 等. 氮磷钾与有机肥配施对番茄产量品质及土壤酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(10): 2059-2058. [Zhang Enping, Tan Fulei, Wang Yue, et al. Effects of N, P, K fertilizers and organic manure on nutritional quality, yield of tomato and soil enzyme activities[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42 (10): 2059-2067.]

[68] 勒佳佳, 苏原, 彭庆文, 等. 氮添加对天山高寒草原土壤酶活性和酶化学计量特征的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 382-389. [Le Jiajia, Su Yuan, Peng Qingwen, et al. Effects of nitrogen

addition on soil enzyme activities and ecoenzymatic stoichiometry in alpine grassland of the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 382−389.]

[69] 杨金芳. 矿井废水灌溉对小麦生长及土壤环境的影响研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012. [Yang Jinfang. Effect of Mine Wastewater Irrigation on Wheat Growth and Soil Environment[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2012.]

[70] 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 等. 西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2845−2852. [Yang Yi, Ouyang Yundong, Chen Hao, et al. Effects of vegetation restoration on soil nitrogen pathways in a karst region of southwest China[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2845−2852.]

[71] 马源, 杨洁, 张德罡, 等. 高寒草甸退化对祁连山土壤微生物生物量和氮矿化速率的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(8): 2680−2690. [Ma Yuan, Yang Jie, Zhag Degang, et al. Effects of alpine meadow degradation on soil microbial biomass and nitrogen mineralization rate in the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): 2680−2690.]

Spatial distribution of soil nitrogen along a mine water discharge lake: Taking Yuangeda Lake in Lingwu City, Ningxia Province

DUAN Wen-yan, YU Xiao-juan, TANG Ming, YAN Jie,
LI Xin, ZHANG Wen-rui, SHENG Min

(*College of Forestry*, *Northwest A & F University*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: The nitrogen content, nitrogen variation coefficient, and soil enzyme activity along the waterfront, coastal land, and natural areas of Yuangeda Lake were assessed. Yuangeda is a drainage lake that collects effluent from Yangchangwan mine in Lingwu City, Ningxia Hui Autonomous Region. Spatial variation in the nitrogen interception effect along the waterfront and coastal area with increasing distance from the drainage outlet was also analyzed. The main objectives of this study were to explore the spatial distribution of nitrogen in the river and lake bank and examine the interception and buffering effects of the river and lake shores on mine water nitrogen. The spatial distribution of nitrogen in coastal soils was heterogeneous. The soil nitrogen distribution characteristics varied between the waterfront area and the surrounding natural area, whereas the coastal land area and the surrounding natural area were similar. The soil organic nitrogen exhibited stronger spatial heterogeneity than inorganic nitrogen. Among the various organic nitrogen forms, particulate organic nitrogen was mostly confined to the waterfront area close to shore, while amino acid nitrogen and soluble organic nitrogen required a wider interception area. The particulate organic nitrogen retention effect in the waterfront area decreased with distance from the mine water discharge port. The amino acid nitrogen interception effect in the waterfront area and the coastal land area gradually decreased up to 1400 m and then stabilized. The soluble organic nitrogen interception effect observed in the waterfront area and coastal land area was independent of the distance from the mine water outlet, which can be attributed to the high mobility of soluble nitrogen in water. Although riparian soils contributed to the absorption and buffering of soluble organic nitrogen, its high mobility resulted in a more uniform soil distribution. The spatial heterogeneity of riparian soil nitrogen was unrelated to soil enzyme activity. In summary, the waterfront soil has an interception effect on organic nitrogen in the mine water, which mostly occurs in the coastal zone < 1400 m from the discharge outlet. The coastal soil interception effect on mine water nitrogen was the dominant factor in the spatial distribution of nitrogen. The results of this study could provide guidance for the design of mine water discharge routes and the development and utilization of mine water resources.

Keywords: mine water; soil nitrogen; coastal zone; spatial distribution